

# Лекция №4

**Механические колебания. Волны.  
Акустика. Ультразвук**

# План:

1. **МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ**
2. **Характеристики колебаний**
3. **Кинетическая и потенциальная энергия колебаний**
4. **Вынужденные колебания**
5. **Математический маятник**
6. **Механические волны**
7. **ЗВУК. АКУСТИКА**
8. **Звуковые методы исследования в клинике**
9. **Ультразвуковые колебания. Воздействия ультразвука на биологические ткани**
10. **Эффект Доплера и его применение в медицине.**

# РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

## **Обязательная:**

- ♦ Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика: учебник. -М.: Дрофа, 2007.-

## **Дополнительная:**

- ♦ Федорова В.Н. Краткий курс медицинской и биологической физики с элементами реабилитологии: учебное пособие. -М.: Физматлит, 2005.-
- ♦ Антонов В.Ф. Физика и биофизика. Курс лекций: учебное пособие.-М.: ГЭОТАР-Медиа, 2006.-
- ♦ Богомоллов В.М. Общая физиотерапия: учебник. -М.: Медицина, 2003.-
- ♦ Самойлов В.О. Медицинская биофизика: учебник. -СПб.: Спецлит, 2004.-
- ♦ Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике для самост. работы студентов /сост. О.Д. Барцева и др. -Красноярск: Литера-принт, 2009.-
- ♦ Сборник задач по медицинской и биологической физике: учебное пособие для самост. работы студентов / сост. О.П.Квашнина и др. -Красноярск: тип.КрасГМА, 2007.-
- ♦ Физика. Физические методы исследования в биологии и медицине: метод. указания к внеаудит. работе студентов по спец. – педиатрия / сост. О.П.Квашнина и др. - Красноярск: тип.КрасГМУ, 2009.-

## **Электронные ресурсы:**

- ♦ Ресурсы интернет
- ♦ Электронная медицинская библиотека. Т.4. Физика и биофизика.- М.: Русский врач, 2004.

# Механические колебательные процессы и живой организм (Биомеханика)

Этот вопрос нас интересует в двух аспектах:

1. Организм как колебательная система:

- а) сердце;
- б) биоритмы;
- в) пульсирующий ток крови;
- г) синтез звуковых колебаний (гортань);
- д) дыхательный процесс.

2. Воздействие колебаний (волн) на организм:

- а) особенности слухового восприятия;
- б) вибрации;
- в) ультразвуковые колебания;
- г) инфразвуковые колебания.

# 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

**Колебания** - это движения, которые повторяются с течением времени.

**Колебательная система** - тело или несколько тел, которые совершают колебания.

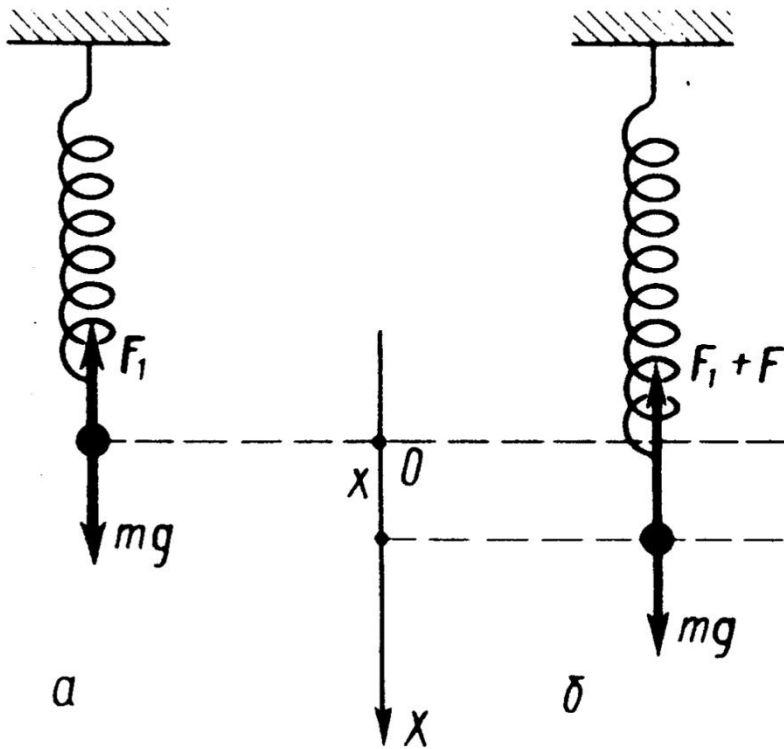
**Условия возникновения колебаний:**

1. На систему должна подействовать внешняя сила, которая изменяет ее координату относительно положения равновесия. В результате система получает запас потенциальной или кинетической энергии.
2. В системе должна возникать упругая или квазиупругая сила, которая всегда направлена к положению равновесия и прямо пропорциональна смещению тела от положения равновесия.
- 3 Сила трения в системе должна быть малой по величине

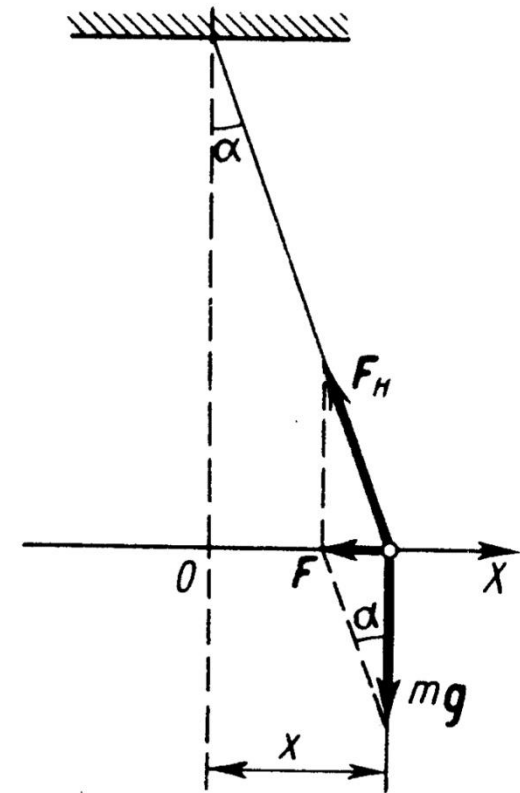
**Квазиупругая сила** - неупругая по природе, но имеет такие же свойства, как и упругая сила.

# Примеры колебательных систем

Пружинный маятник



Математический маятник



## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАНИЙ

**Период (T)** – время одного полного колебания.

Единица измерения [T] – с (секунда)

**Частота (ν)** – число колебаний за единицу времени.

Единица измерения [ν] – Гц (герц).

$$T = \frac{1}{\nu}; \quad \nu = \frac{1}{T}$$

**Циклическая частота (ω)** – число колебаний за 2π секунд.

Единица измерения [ω] – рад/с

$$\omega = 2\pi\nu; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

**Амплитуда колебания (А)** – максимальное значение изменяющейся величины.

В уравнении  $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$

$x$  – смещение тела от положения равновесия в любой момент времени,

$A = x_{\text{макс}}$  – амплитуда смещения

**Фаза колебаний ( $\varphi$ )** определяет состояние колебательной системы в произвольный момент времени. Единица измерения  $[\varphi]$  – рад (радиан).

$\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$  , где  $\varphi_0$  - начальная фаза колебаний (при  $t=0$ )



**Скорость и ускорение** в гармоническом колебательном движении точки определяются соответствующими производными по времени:

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

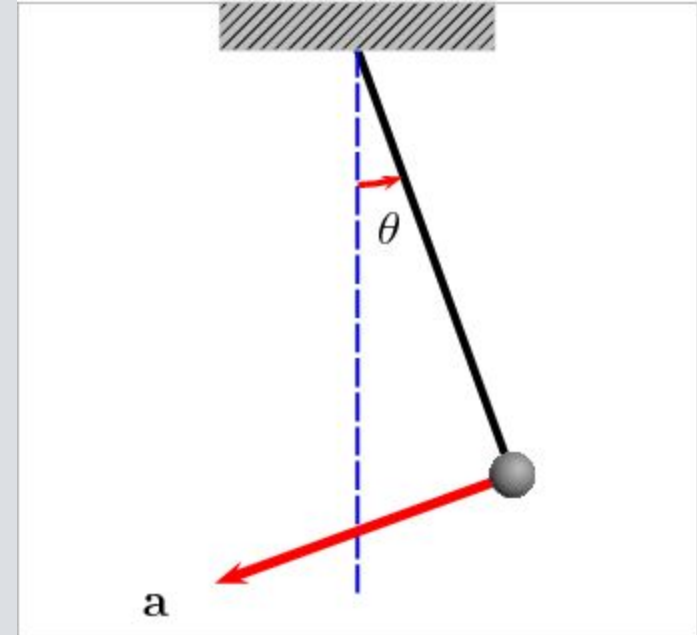
$$v_x = \dot{x} = -\omega A \cos(\omega t + \varphi_0) = \omega A \sin\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$a_x = \ddot{x} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x = \omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

- **Скорость** изменяется по гармоническому закону, но **ее амплитуда больше амплитуды  $x$  в  $\omega$  раз и опережает  $x$  на  $\pi/2$**

- **Ускорение** изменяется по гармоническому закону, но **его амплитуда больше в  $\omega^2$  раз и опережает  $x$  на  $\pi$**

-(т.е. в противофазе с  $x$ )



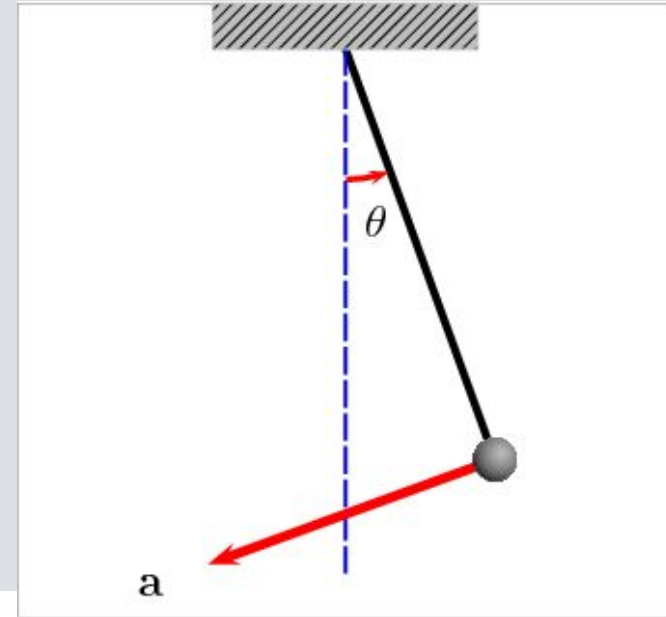
# Способы представления гармонических колебаний

## колебаний

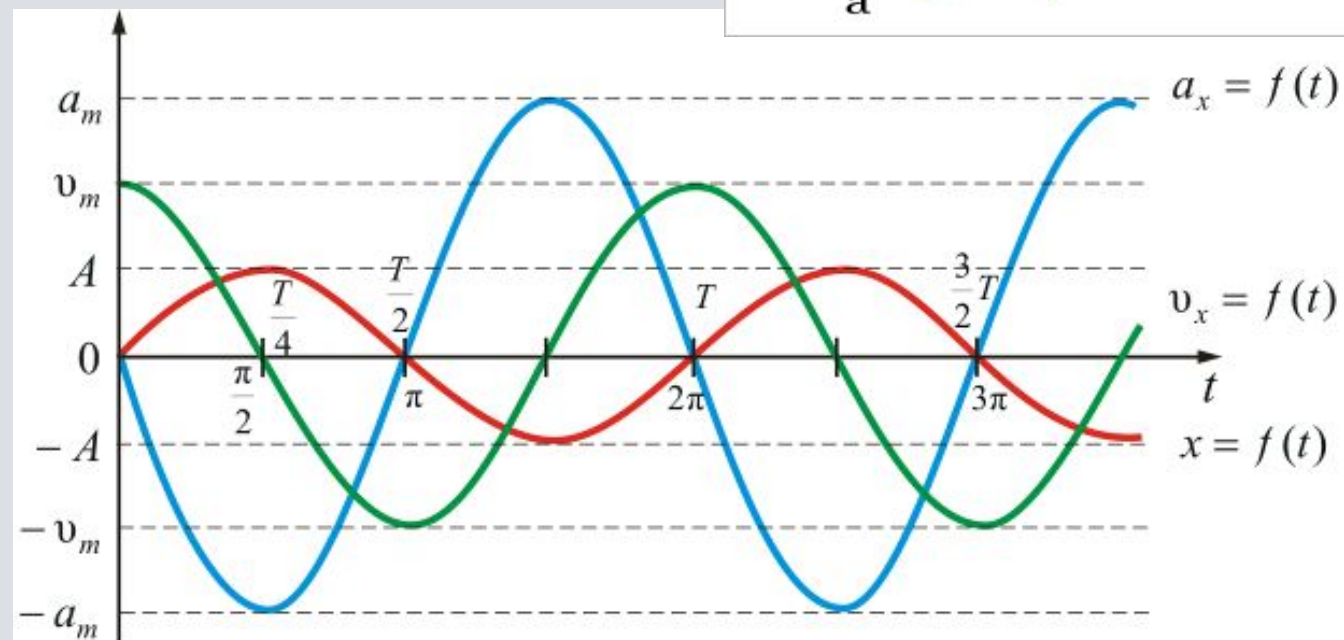
а) аналитический:  $x = a \sin(\omega t + \alpha)$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos(\omega t + \varphi) = v_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 a \sin(\omega t + \varphi) = -a_m \sin(\omega t + \varphi)$$



б) графический:



### 3. КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ КОЛЕБАНИЙ

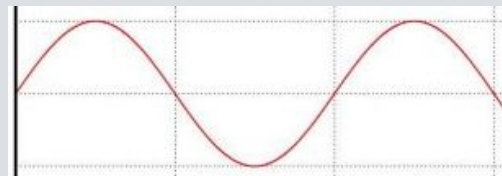
- Если проходим через положение равновесия, то вся энергия переходит в кинетическую (потенциальная = 0) и, наоборот, в крайнем положении вся энергия переходит в потенциальную.

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2} = \frac{kA^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}, T_{\text{макс}} = \frac{kA^2}{2}$$

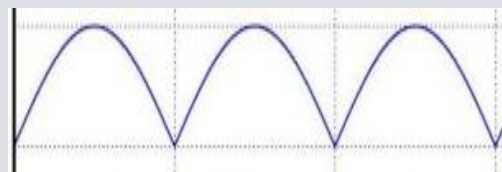
$$U = \frac{kx^2}{2} = \frac{kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}, U_{\text{макс}} = \frac{kA^2}{2} = T_{\text{макс}}$$

$$E = T + U = \frac{kA^2}{2} (\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)) = \frac{kA^2}{2} = \text{const}$$

Сравнивая графики  $\sin^2$  и  $\sin$  можно видеть, что **T и U изменяются с частотой  $2\omega_0$** . Т.е. энергия от T к U и наоборот в процессе колебаний перекачивается в два раза быстрее.

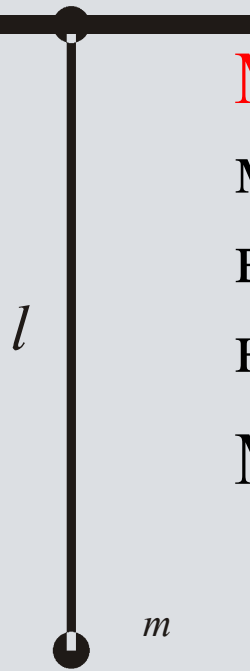


$\sin x$



$\sin^2 x$

## 4. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК



**Математическим маятником** называется тело, массу которого можно считать сосредоточенной в одной точке, подвешенное на невесомой, нерастяжимой нити.

Момент инерции материальной точки  $I = ml^2$

$$\omega = \sqrt{\frac{mgR}{I}} = \sqrt{\frac{mgl}{ml^2}} = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Т.е. из-за разного характера распределения массы есть отличие в частоте колебаний математического маятника и стержня той же длины и массы.

# Математический и физический маятники

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgL}}$$

**Приведённая длина** — это условная характеристика физического маятника — это условная характеристика физического маятника. Она численно равна длине математического маятника, период которого равен  $\frac{I}{ma}$  периоду данного физического маятника.

Приведённая длина вычисляется следующим образом:

где  $I$  — момент инерции где  $I$  — момент инерции относительно точки подвеса,  $m$  — масса, а  $a$  — расстояние от точки подвеса до центра масс.

Измерив период колебаний маятника, можно определить ускорение свободного падения  $g$  в данном месте.

Частота **собственных** колебаний зависит только от свойств системы ( $\omega_0^2 = k/m$  для математического и  $\omega_0^2 = mgR/I$  для физического маятников),

## 5. Вынужденные колебания

Согласно II закону Ньютона  $m\ddot{a} = \overset{\square}{F}_{\text{упр}} + \overset{\square}{F}_{\text{Тр}} + \overset{\square}{F}_{\text{вн}}$ , где

$F_{\text{вн}} = F_0 \sin \omega_{\text{вн}} t$  - внешняя (вынуждающая) сила, изменяющаяся по гармоническому закону

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx + r \frac{dx}{dt} = F_0 \sin \omega_{\text{вн}} t \quad \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} = \frac{F_0}{m} \sin \omega_{\text{вн}} t$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x + 2\beta \frac{dx}{dt} = f_0 \sin \omega_{\text{вн}} t \quad \text{- дифференциальное уравнение вынужденных колебаний}$$

Решения этого уравнения:  $x = A \sin(\omega t + \varphi); \quad x = A \cos(\omega t + \varphi)$

где амплитуда колебаний

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{\text{вн}}^2)^2 + 4\beta^2 \omega_{\text{вн}}^2}},$$

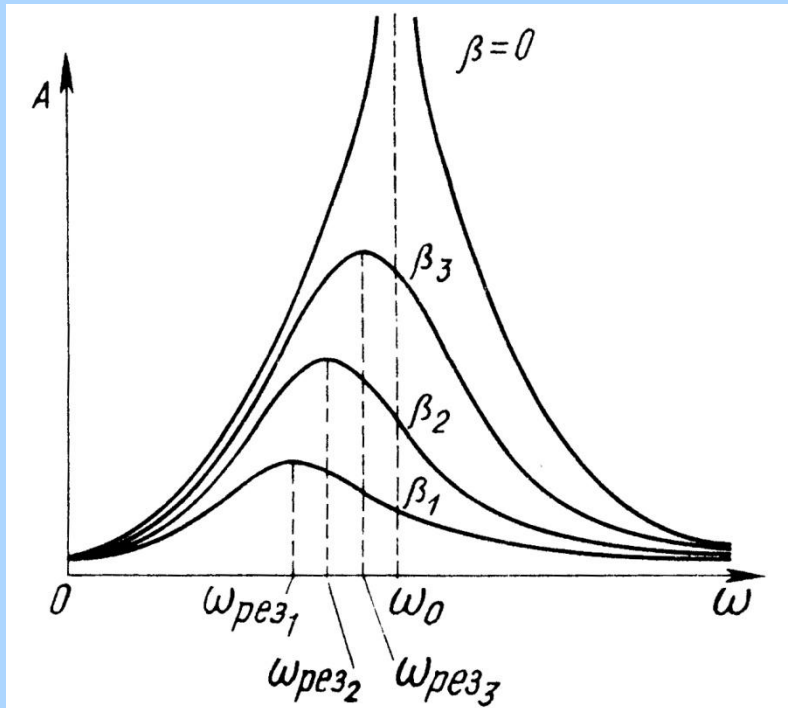
а  $\omega = \omega_{\text{вн}}$  (частота вынужденных колебаний равна частоте вынуждающей силы)

**Резонанс** – явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении собственной частоты колебаний системы с частотой вынуждающей силы:

$$\omega_0 = \omega_{вн}$$

Резонансная частота  $\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$

Резонансные кривые при разных значениях коэффициента затухания  $\beta$ :



С уменьшением коэффициента затухания ( $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$ ) увеличивается резонансная частота.

Если  $\beta=0$  (в системе без трения), амплитуда вынужденных колебаний бесконечно велика ( $A \rightarrow \infty$ ).

# Автоколебания

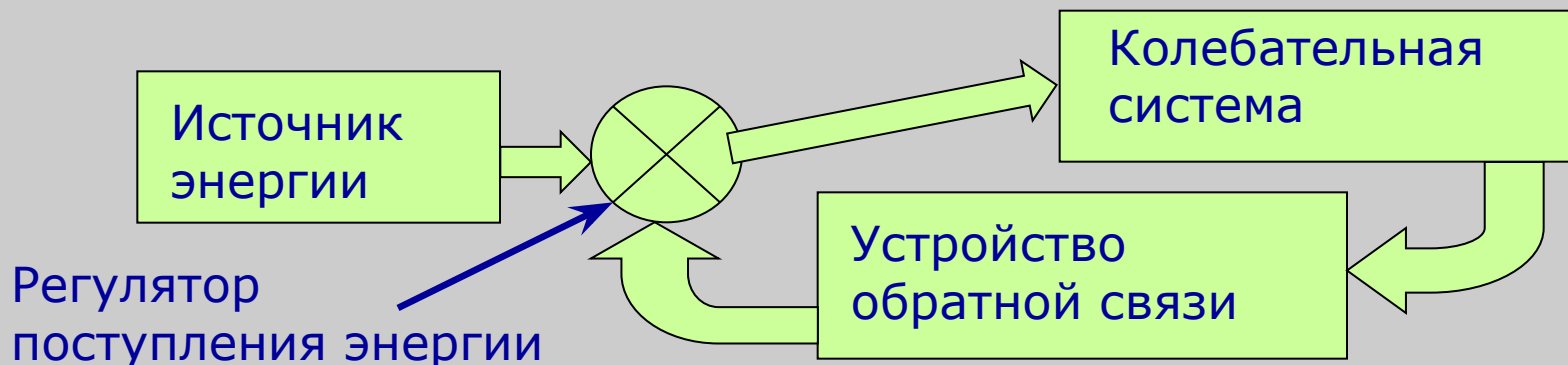
**Автоколебания** - это вынужденные колебания, происходящие под действием внешней силы, частоту которой задает сама колебательная система.

Так как система обладает собственной частотой  $\omega_0$ , то и автоколебания будут происходить с частотой близкой к ней, т. е. автоколебательная система будет находиться в состоянии близком к резонансу.

Такие колебания требуют минимальных затрат энергии.

Автоколебания очень широко применяются в технике, особенно в электронике. В биологических объектах практически все колебания носят автоколебательный характер.

Всем автоколебаниям присуща одна характерная особенность: наличие механизма обратной связи





## 6. Механические волны

**Механическая волна** – процесс распространения колебаний в упругих средах (твёрдых телах, жидкостях, газах).

Источник волны – колебательная система.

Частицы упругой среды совершают вынужденные колебания около положения равновесия.

Волна не переносит вещество, но переносит энергию.

Если уравнение колебаний источника  $x = A \sin \omega_0 t$

то уравнение волны имеет вид:

$$S = A \sin \left[ \omega \left( t - \frac{l}{v} \right) \right], \text{ где}$$

$S$  – смещение частицы среды от положения равновесия;

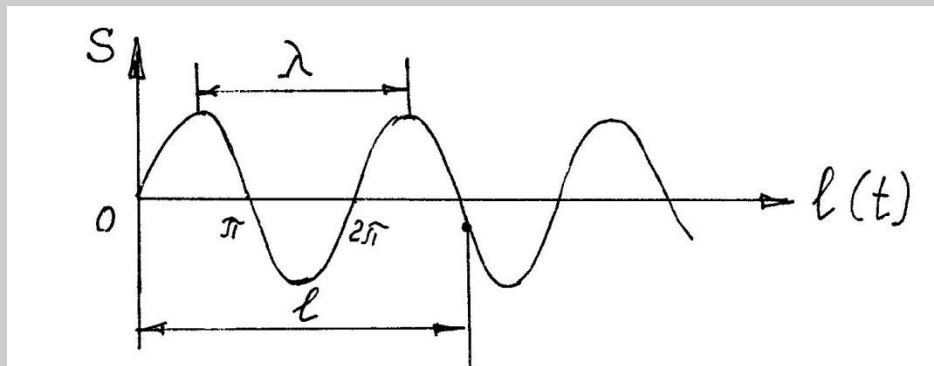
$A$  – амплитуда колебания частиц среды;

$\omega$  – частота вынужденных колебаний (равна частоте колебаний источника);

$l$  – расстояние от источника волны до данной точки среды;

$v$  – скорость волны;

$\frac{l}{v} = \tau$  – время, за которое волна дошла до данной точки



# Виды механических волн

Различают волны **продольные** и **поперечные**.

В **продольной волне** колебания частиц среды совершаются вдоль направления распространения волны.

Продольные волны распространяются во всех упругих средах.

В **поперечной волне** колебания частиц среды совершаются перпендикулярно направлению распространения волны.

Поперечные волны распространяются в твёрдых телах и на поверхности жидкости.

# Характеристики волн

**Скорость ( $v$ )** – расстояние, которое проходит волна за единицу времени.

В однородной среде волны распространяются с постоянной скоростью. Скорость волны зависит от свойств среды – упругости и плотности. Чем больше плотность и упругость среды, тем больше скорость волны. Скорость механических волн в твёрдых средах больше, чем в жидких, а в жидких средах – больше, чем в газах.

**Длина волны ( $\lambda$ )** – расстояние (вдоль направления распространения волны) между точками, фазы которых одинаковы *или* расстояние, которое прошла волна за время, равное **периоду колебаний ( $T$ )**.

$$\lambda = v \cdot T \quad T = \frac{1}{\nu} \quad \lambda = \frac{v}{\nu}$$

При переходе волны из одной среды в другую изменяется скорость волны, так как изменяются свойства среды. Значит изменяется и длина волны. Частота колебаний при этом не изменяется.

**Фронт волны** – совокупность точек среды, колеблющихся в один и тот же момент времени в одной фазе.

Волна называется **плоской**, если фронтом волны является плоскость, перпендикулярная направлению её распространения.

## Энергетические характеристики:

**Поток энергии ( $\Phi$ )** – энергия, переносимая волной через любую поверхность за единицу времени.

Единица измерения [ $\Phi$ ] – Дж/с = Вт

$$\Phi = \frac{E}{t}$$

**Интенсивность ( $I$ )** – поток энергии волны через единицу площади – плотность потока энергии

Единица измерения [ $I$ ] – Вт/м<sup>2</sup>

$$I = \frac{\Phi}{S}$$

$I = \frac{E}{t \cdot S}$  энергия, переносимая волной за единицу времени через единицу площади, перпендикулярной к направлению распространения волны.

$$\varepsilon = \frac{E}{V} \quad (\text{Дж/м}^3) - \text{объёмная плотность энергии}$$

$$\vec{I} = \varepsilon \vec{v} \quad - \text{вектор Умова (вектор, равный по модулю интенсивности волны и совпадающий с направлением вектора скорости)}$$

---

**Интерференция** – сложение волн, в результате которого интенсивность результирующей волны в разных точках пространства принимает значение от минимального до максимального.

**Дифракция** – отклонение волны от прямолинейного распространения на резких неоднородностях среды. Дифракция возникает, если длина волны сравнима с размерами препятствия (меньше его).

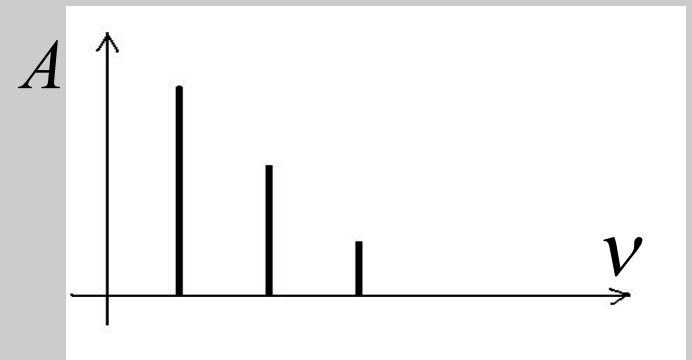
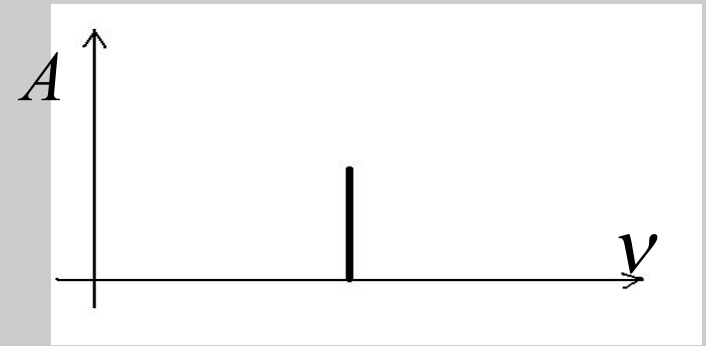
Условия **отражения** и **преломления** волн на границах среды определяются волновым сопротивлением среды ( $\rho v$ , где  $\rho$  – плотность среды,  $v$  – скорость волны).

## 7. ЗВУК. АКУСТИКА

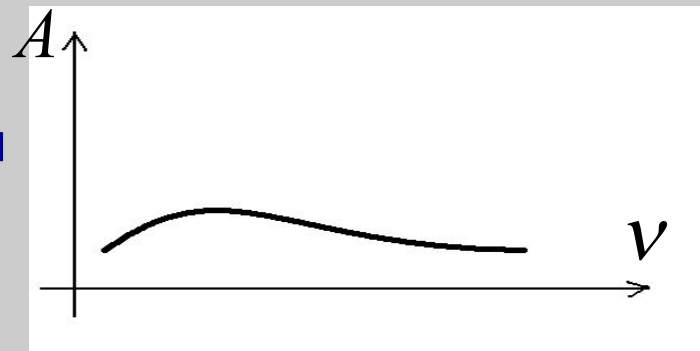
**Звук** - механические колебания, распространяющиеся в упругой среде в виде продольных волн, воспринимаемые ухом человека, т.е. лежащие в диапазоне частот от 16 Гц до 20000 Гц.

### Виды звуков:

1. **Простой тон** – гармонические колебания определенной частоты
2. **Сложный тон** – колебание, являющееся суммой нескольких гармонических колебаний



3. **Шум** – сложный звук, являющийся суммой не повторяющихся во времени колебаний, среди которых невозможно выделить определенные частоты



4. **Удар** – не повторяющееся во времени колебание, которое происходит за очень малое время. Например, хлопок, взрыв и т.п.



# Физические характеристики звука

**Частота звука ( $\nu$ )** находится в пределах от 16 Гц до 20 кГц.

**Интенсивность звука ( $I$ )** изменяется в широком диапазоне.

Минимальная интенсивность, которая вызывает слуховое ощущение, называется **порогом слышимости ( $I_0$ )**.

Интенсивность звука, который вызывает чувство боли, называется **порогом болевого ощущения ( $I_{\text{макс}}$ )**.

Для частоты в 1000 Гц:

$$I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

$$I_{\text{макс}} = 10^2 \text{ Вт/м}^2$$

**Скорость звука ( $v$ )** различна в разных средах. Например, в воздухе  $v \approx 330$  м/с, в воде  $v \approx 1457$  м/с, в железе  $v \approx 5000$  м/с.

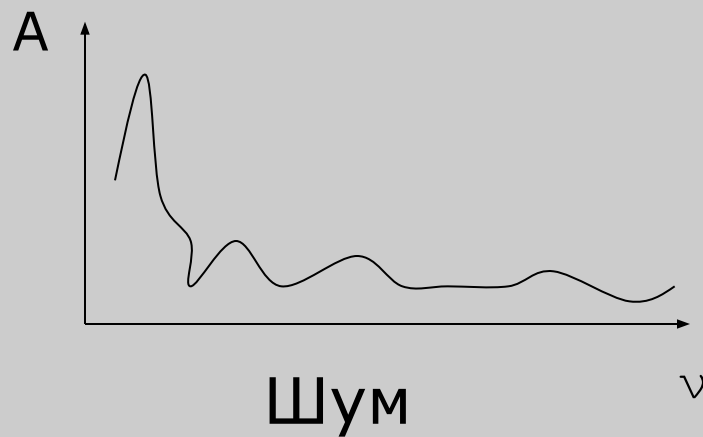
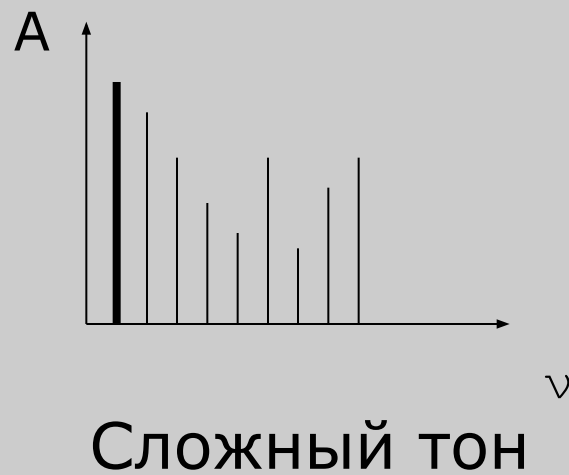
**Звуковое (акустическое) давление** – давление, возникающее в среде при прохождении звуковых волн

$$p = \sqrt{2\rho v I}$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $v$  – скорость звука,  
 $I$  – интенсивность звука.

**Акустический спектр** – набор частот, которые входят в сложный тон, с указанием их амплитуд.

# Акустические спектры



# **Объективные характеристики звука**

**Частота** – количество колебаний в  
единицу времени

**Интенсивность**

**Звуковое давление**

**Акустический или гармонический  
спектр**

# Характеристики слухового ощущения

Характеристики слухового ощущения являются **субъективными**. Они связаны с объективными (физическими) характеристиками.

Субъективные характеристики звука:

**Высота тона** определяется частотой звуковой волны. Чем больше частота, тем выше тон.

**Тембр** – звуковая окраска основного тона. Определяется акустическим спектром. Основной тон – звук минимальной частоты в акустическом спектре. Остальные тоны называют обертонами. Чем больше тонов в акустическом спектре, тем богаче тембр звука.

**Громкость звука** характеризует уровень слухового ощущения, зависит от интенсивности звука и частоты.

## Связь интенсивности и громкости, **психофизический закон Вебера – Фехнера**:

При одинаковой частоте возрастание интенсивности звука в геометрической прогрессии ( $I, I^2, I^3 \dots$ ), воспринимается ухом в арифметической прогрессии ( $E, 2E, 3E \dots$ )

$$E = k \lg \frac{I}{I_0}$$

где  $E$  – уровень громкости (измеряется в фонах),  
 $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от частоты и интенсивности,  
 $I_0$  – порог слышимости,  
 $I$  – интенсивность звука.

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

– уровень интенсивности звука. Единица измерения – бел. 1 децибел = 0,1 бел.  
 $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> интенсивность на пороге слышимости на частоте 1 кГц

# Громкость звука $E$

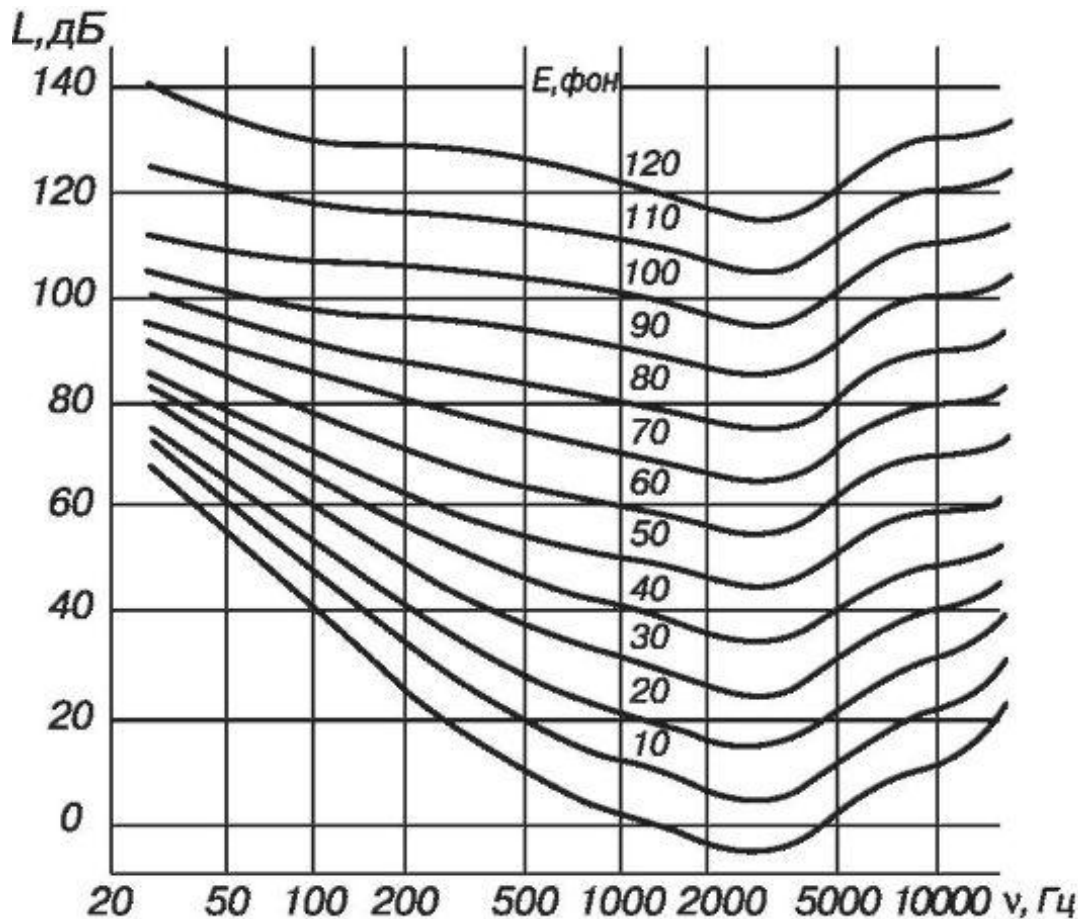
Громкость звука измеряется в фонах

На частоте 1кГц  $K=1$

$$E = 10 * \lg \frac{I}{I_0} \quad \Phi(\text{фон})$$

Для отличия от шкалы интенсивности звука в шкале громкости децибелы называют фонами.  
При частоте звука в 1000 Гц шкалы интенсивности и громкости совпадают.

## Кривые равной громкости



Кривые равной громкости позволяют найти соответствие между громкостью и интенсивностью звука на разных частотах

**Аудиометрия** – метод измерения остроты слуха



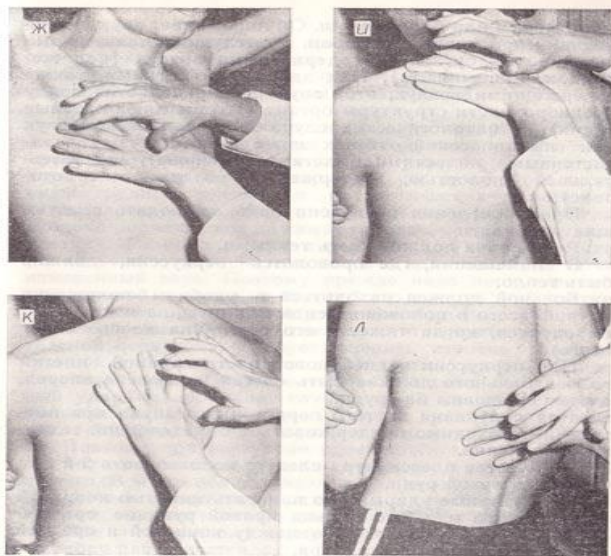
Примерный характер звука	Интенсивность звука (Вт/м <sup>2</sup> )	Звуковое давление (Па)	Уровень интенсивности звука (Дб)
Порог слышимости	$10^{-12}$	0,00002	0
Шепот	$10^{-10}$	0,0002	20
Разговор нормальным голосом	$10^{-7}$	0,0064	50
Разговор громким голосом	$10^{-6}$	0,02	60
Шум на оживленной улице	$10^{-5}$	0,64	80
Крик	$10^{-4}$	0,2	80
Порог болевого ощущения	10	64	130

# Физические основы звуковых методов исследования в клинике

## 1. Перкуссия

Лат. Percussio – удар, простукивание

Метод исследования внутренних органов, основанный на **простукивании** по поверхности тела больного с оценкой характера возникающих при этом звуков.



Характер перкуторного звука зависит от количества **воздуха** в органе, от **упругости** тканей.

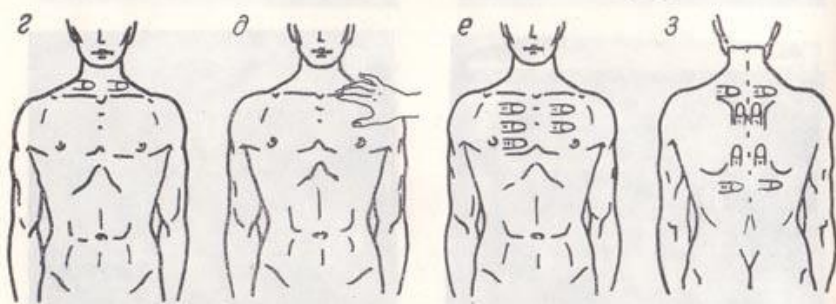
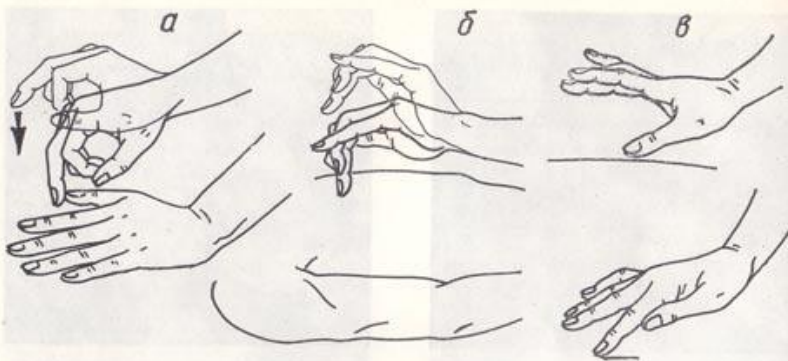
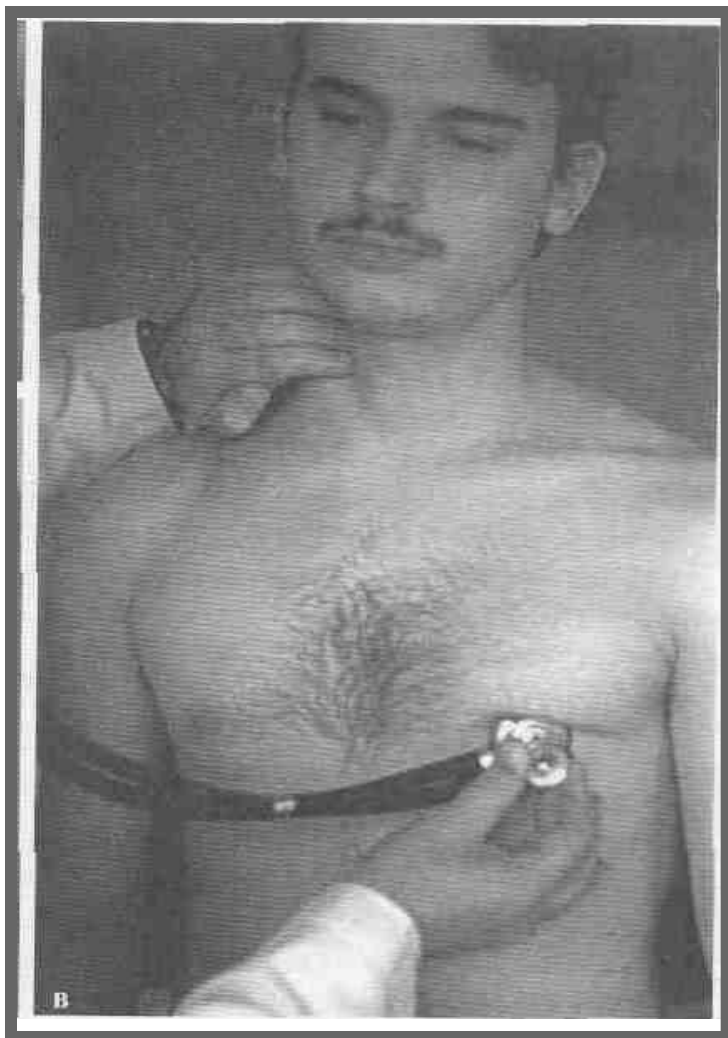


Рис. 29. Сравнительная перкуссия легких:

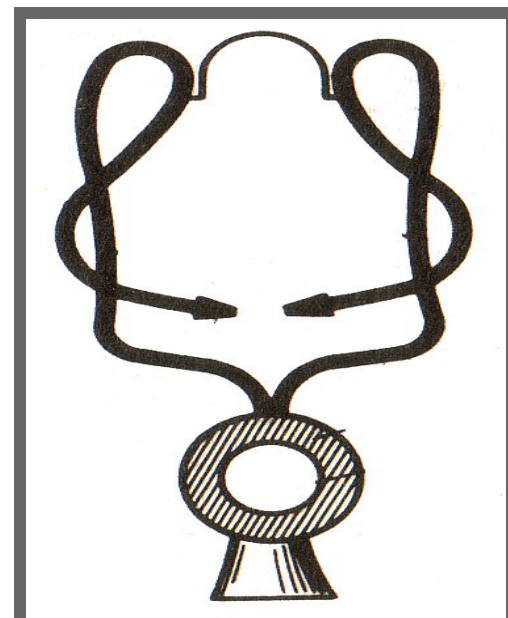
Изобрел в 1761 г. австрийский терапевт **Аэнбруггер**, по совместительству **музыкант**. Он был сыном **трактирщика** и в детстве помогал отцу разливать вино, **простукивая бочки**, чтобы узнать, насколько они наполнены **вином**.



**2. Аускультация** – метод исследования внутренних органов, основанный на выслушивании



звуковых явлений, возникающих при **физиологической деятельности** внутренних органов.



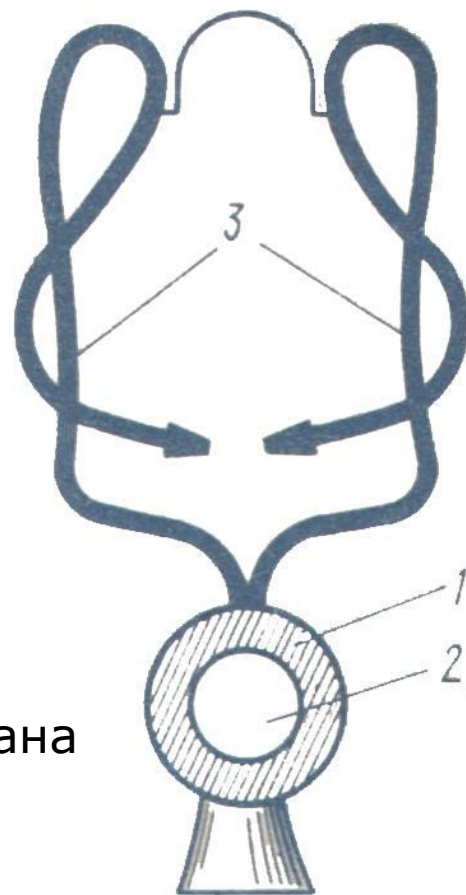
фонендоскоп



**Аускультация (выслушивание)** – с помощью стетоскопа или фонендоскопа

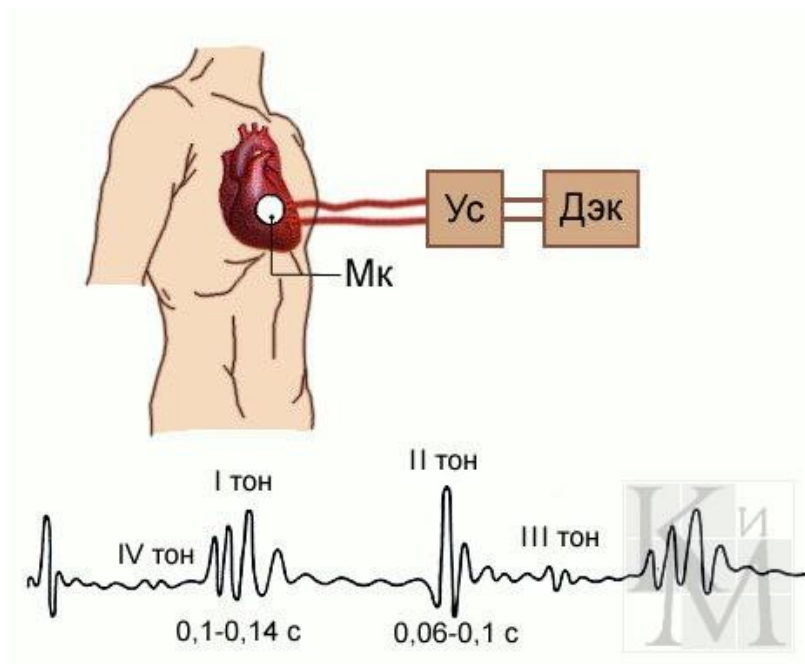


- 1 – полая капсула
- 2 – передающая звук мембрана
- 3 – резиновые трубки





# Фонокардиография (ФКГ) – графическая регистрация тонов и шумов сердца



# Диагностика органов слуха

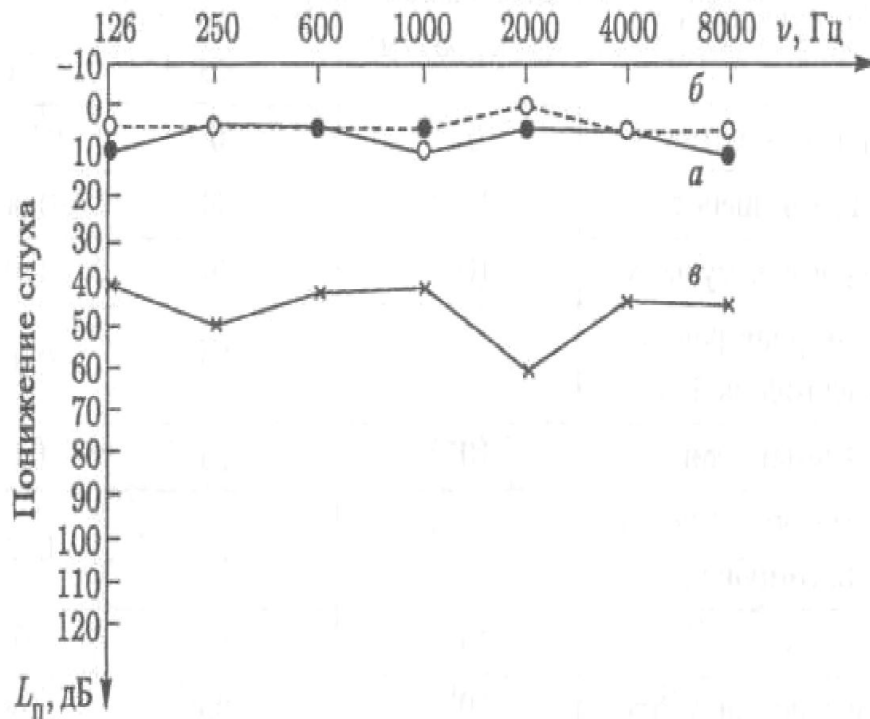
Метод измерения остроты слуха называется **аудиометрией**.

На специальном приборе (**аудиометре**) определяют порог слухового ощущения на разных частотах.





# Аудиограммы



**кривые, которые отражают зависимость порога восприятия от частоты тона, то есть это спектральная характеристика уха на пороге слышимости.**

# 9. Биофизика ультразвука

**Ультразвуком (УЗ)** называют механические колебания и волны, частоты которых более 20 кГц

**Скорость УЗ** и звука определяется плотностью среды. Зависимость прямая.

## Получение ультразвуковых колебаний

### **Электромеханические излучатели:**

1. Основанные на явлении обратного пьезоэлектрического эффекта (высокочастотный УЗ)
2. Основанные на явлении магнитострикции (низкочастотный УЗ)

## 2. Обратный пьезоэффект

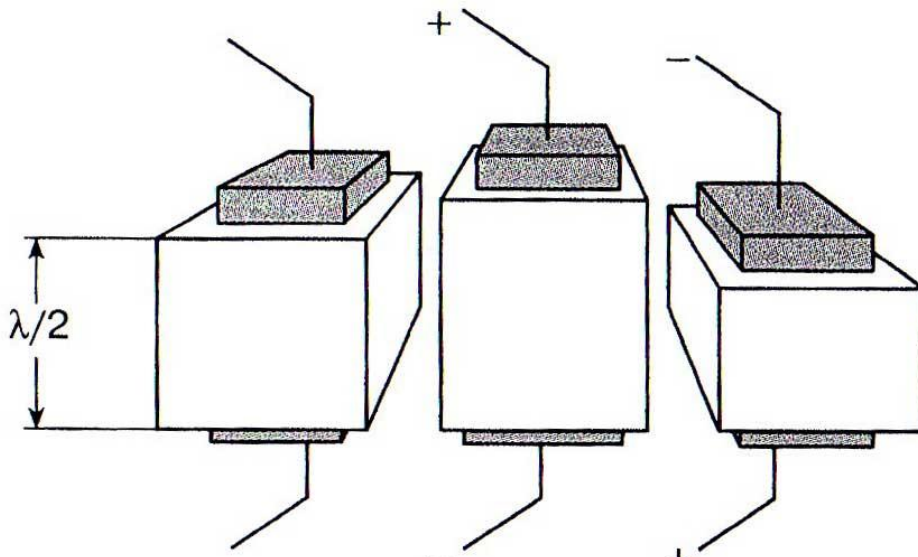
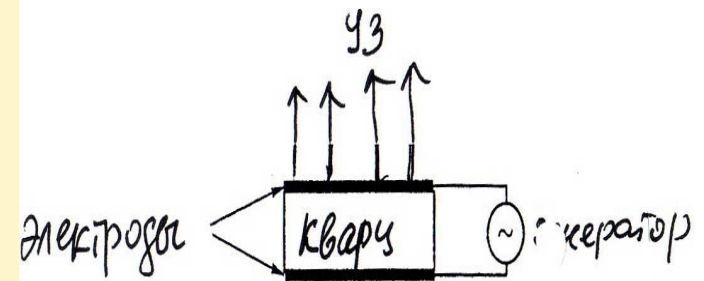


Схема кристалла с пьезоэлектрическими свойствами. Кристалл изменяет форму, когда окружающее электрическое поле меняет направление на противоположное. Длина волны излучаемого ультразвука является функцией размера кристалла.

Заключается в механической деформации тел под действием электрического поля.

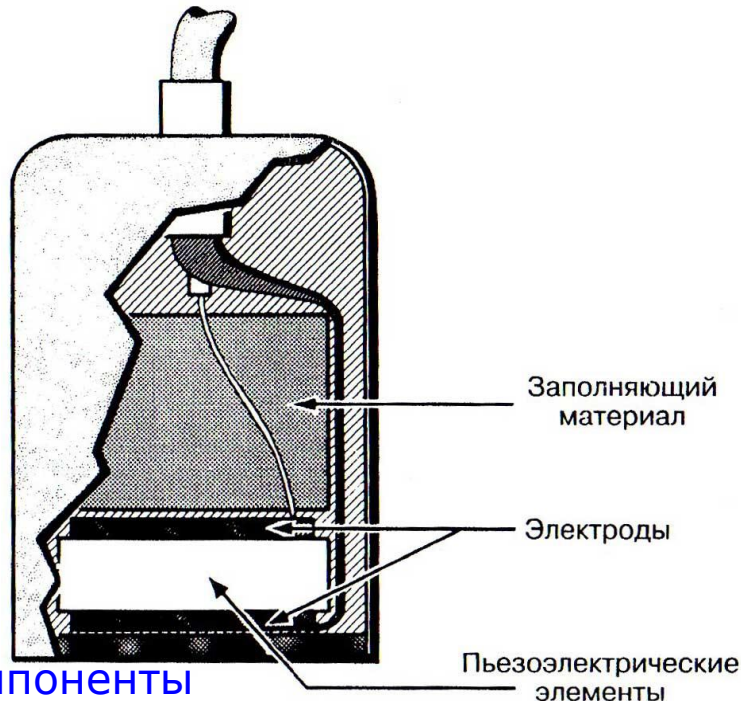
$$V_{уз} = 10 \text{ МГц}$$



Толщина кварца **1мм**

Почему обратный?

# Приемники УЗ: прямой пьезоэффект



Основные компоненты  
ультразвукового датчика

Под действием УЗ происходит деформация кварца, которая приводит к генерации переменного электрического поля.

Эл. Импульс  $\longleftrightarrow$  УЗ

# Особенности распространения УЗ волн

Лучевой характер

Легко  
фокусировать

Подчиняется законам  
отражения и  
преломления

Малая  $\lambda$   
 $\lambda_{уз} = 2 \div 0,6$   
мм

Возможность  
получения  
больших  
интенсивностей

Отражается от  
объектов  
небольших размеров

# Действие УЗ на вещество, на клетки и ткани организма

**Действие УЗ:**  
**механическое + тепловое + физико-химическое**

Микромассаж  
клеток и тканей

Перестройка БМ

Разрушение  
биомакромолекул,

Разрушение  
клеток и  
микроорганизмов

Изменение  
Проницаемости БМ

**33% → в тепло →**  
**ткани прогреваются**

*Пример:* При облучении УЗ в течение 10 минут брюшной полости собаки **температура** печени **увеличилась** на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , в жировой ткани на  $3^{\circ}\text{C}$ , а в мышечной на  $5^{\circ}\text{C}$ .

**Ионизация и  
диссоциация  
молекул  
вещества**

- образование биологически **активных** молекул
- активность ферментов

**Механическое действие** связано с **деформацией** микроструктуры вещества, вследствие **периодического сближения и отдаления** микрочастиц вещества.

**Например**, в жидкости УЗ волна вызывает разрыв ее целостности с образованием полостей.

Это **кавитация**. Это **энергетически невыгодное состояние** жидкостей, поэтому полости быстро **закрываются с выделением большого количества энергии**.



# Кавитация – разрыв сплошности жидкости.

( Латин. cavitas - пустота, пузырьки).

Возникновение в жидкости, облучаемой УЗ, пульсирующих и захлопывающихся пузырьков.

Заполнены паром или газом

Выделяется значительная энергия

Пузырьки существуют недолго

Разогревается вещество



**Кавитация** – это один из современных методов избавления от излишних жировых отложений.

Сегодня принцип кавитации применяют в различных областях медицины:  
в стоматологии — для удаления зубного налета и камня  
в нефрологии — для удаления камней в почках  
в аппаратной косметологии – для борьбы с жировыми отложениями.

Для лечения и очистки гнойных ран  
дезинфекции и эмульгирования растворов  
создания ингаляционных смесей.



# Применение в медицине

## Диагностика

1. Эхолокационные методы: отражение УЗ

$$I = 50 \text{ мВт/см}^2$$

**Noli nocere!**

$\nu$  от 1 до 30 МГц  
Чаще всего 2,25-5 МГц

1. Метод А      2. Метод М  
3. Метод В

2. Эффект Доплера

## Лечение

**УЗ**  
низких  
интенсивностей

Физиотерапия

$$\nu = 880 \text{ кГц}$$
$$I = 1 \text{ Вт/см}^2$$

Глубина проникновения 3-5 см

УЗ-ингаляция  
фонофорез

**УЗ**  
высоких  
интенсивностей

УЗ хирургия

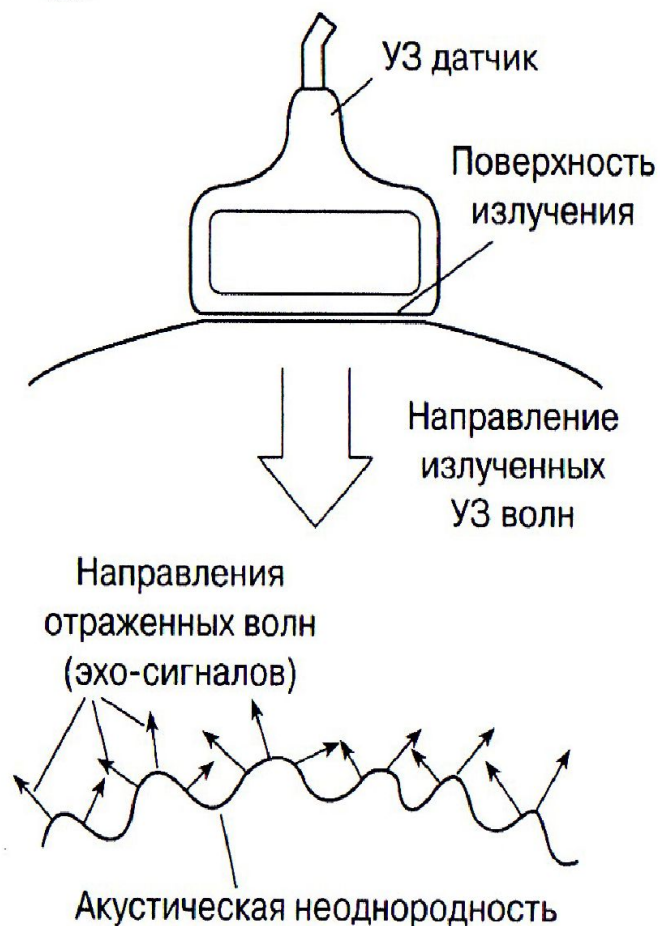
$I = 10^3 \text{ Вт/см}^2$   
Цель: вызвать управляемое избирательное разрушение в тканях.

Два метода:

- Разрушение тканей УЗ  
 $\nu = 4 \text{ МГц}$
- Снижение усилия при резании  $\nu = 50 \text{ кГц}$

**Применение УЗ в диагностике** основано на **отражении** УЗ волн на границе сред с **разными акустическими сопротивлениями**.

**99,9%** времени эхозонд работает как воспринимающее устройство.



Гель используется  
Для исключения  
воздушной прослойки,  
для **выравнивания**  
**акустических**  
**сопротивлений** !

Глубина полупоглощения – глубина, на которой интенсивность УЗ уменьшается вдвое.

Ткань	Глубина полупоглощения, см
Мышечная	2,1
Жировая	3,3
Костная	0,23
Кровь	35

## **Ультразвуковая диагностика – локационные методы**

**Эхоэнцефалография** – определение  
опухолей и отека головного мозга

**Ультразвуковая кардиография** –  
измерение размеров сердца в  
динамике

**Ультразвуковая локация** для  
определения размеров глазных сред

# **Ультразвуковая диагностика**

**Ультразвуковой Доплер эффект** –  
изучают характер движения  
сердечных клапанов; определяют  
скорость кровотока

**По скорости ультразвука**  
определяют место повреждения  
кости

**Ультразвуковая голография**

# Ультразвуковая физиотерапия

**Терапевтическое** действие  
ультразвука обусловлено  
механическим, тепловым и физико-  
химическим факторами

**Фонофорез** - введение с помощью  
ультразвука в ткани через поры кожи  
некоторых лекарственных веществ  
(гидрокортизона, тетрациклина и  
др.).



# **Ультразвуковая хирургия**

**Ультразвуковой скальпель –**  
рассечение тканей

**Ультразвуковой остеосинтез –**  
«сваривания» тканей

**Удаление опухолей** в мозговой  
ткани без вскрытия черепной  
коробки

**Дробление почечных камней**

# **Практическое применение УЗ**

**В фармацевтической промышленности** – создание эмульсий, лекарств, аэрозолей

**В хирургии** - стерилизация медицинских инструментов

**Для ориентировки слепых в пространстве**

# 10. Эффект Доплера и его применение в медицине



Жил в Зальцбурге. Директор первого в мире физического института.



Доплер Христиан (1803-1853) - австрийский физик, математик, астроном.

# Эффект Доплера

**Эффектом Доплера** называют изменение частоты волн, воспринимаемых наблюдателем (приемником волн), вследствие относительного движения источника волн и наблюдателя.

$$\nu'''' = \frac{U + U_H}{U - U_U} \nu$$

$$\nu'''' = \frac{U - U_H}{U + U_U} \nu$$

$$V_{набл} = \frac{V_{зв} + V_{набл}}{V_{зв} - V_{ист}} \cdot V_{ист}$$

Если **приближается** (объект, наблюдатель),  
то скорость берется со знаком «+»

Если **удаляется**, то **скорость** берется  
**со знаком «-»**

Классический **пример** этого  
феномена: Звук свистка от  
движущегося поезда.



**Эффект Доплера** используется для определения скорости движения тела в среде, скорости кровотока, скорости движения клапанов и стенок сердца = доплеровская эхокардиография.

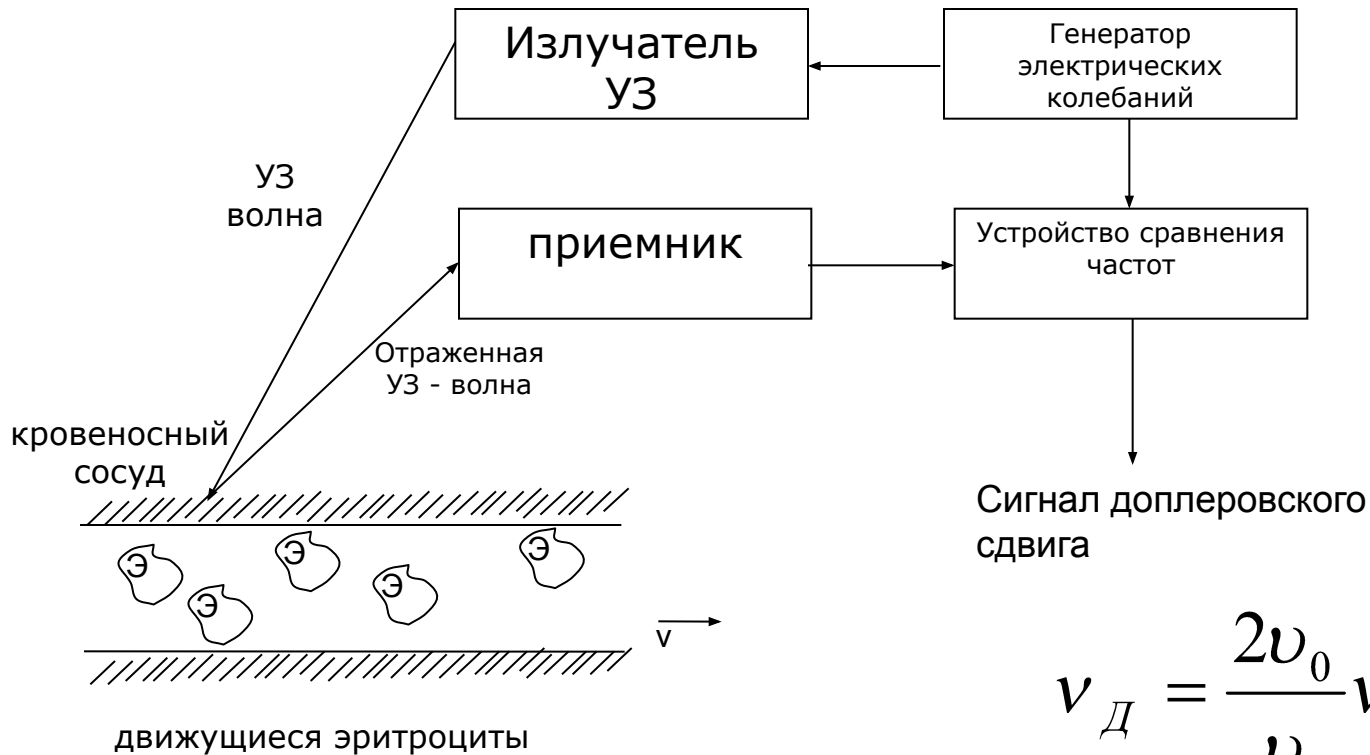
Когда звук **отражается** от движущегося объекта, частота отраженного сигнала **изменяется**. Происходит **сдвиг частоты**.

При наложении первичных и отраженных сигналов возникают **биения**, которые прослушиваются с помощью наушников или громкоговорителя.

$$\Delta \nu \uparrow = \frac{2\nu_0 \uparrow}{\nu_{уз}} \nu_{ген}$$

Доплеровский **сдвиг**- это разность между отраженной и переданной частотами  $\Delta \nu$ .

# Диагностика на основе эффекта Доплера



$$v_D = \frac{2v_0}{u} v_G$$

$v_0$  – скорость движения эритроцитов

$u$  – скорость УЗ

$v_G$  – частота генератора

$v_D$  – доплеровский сдвиг частот



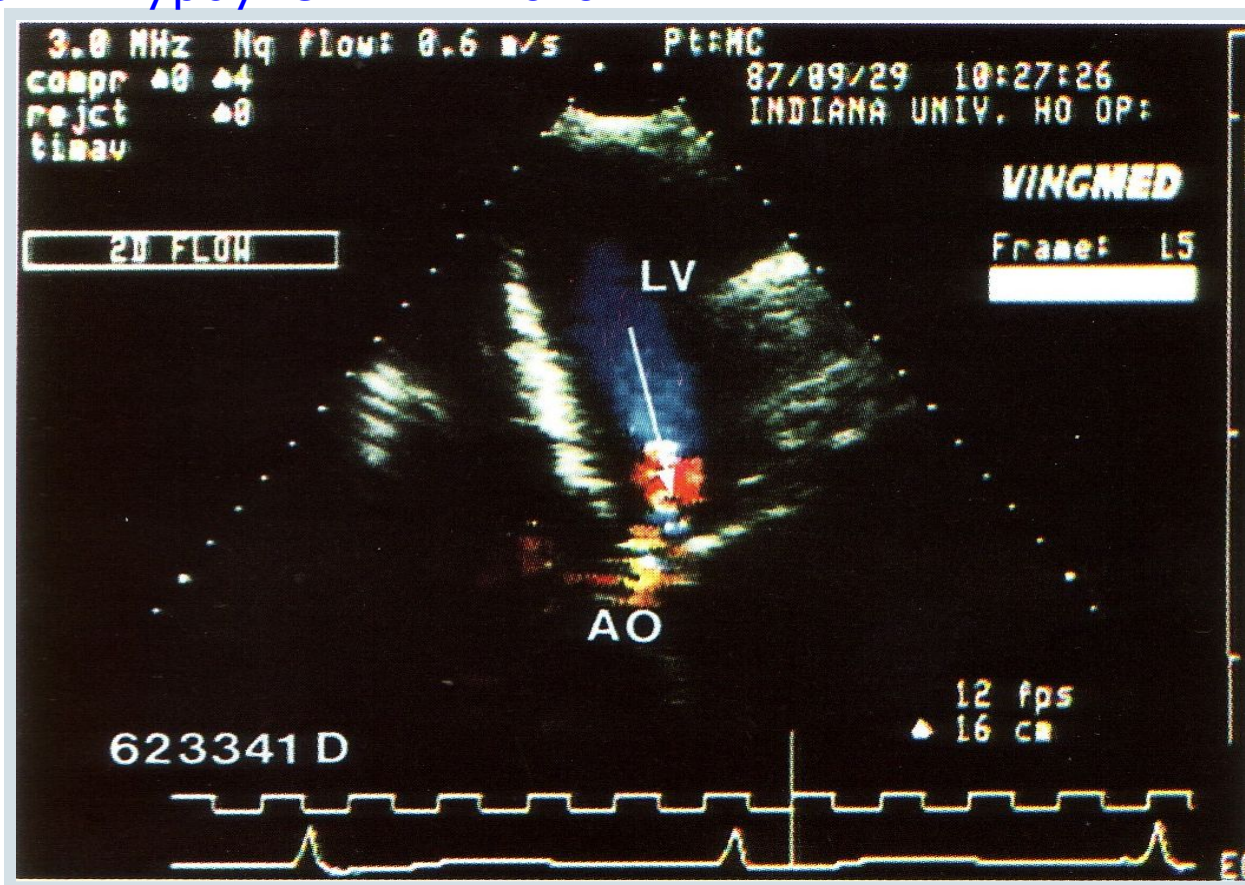
## Допплерометрия

**Благодаря аппарату Доплера гинеколог, ведущий беременность, делает вывод о том, есть ли угроза для развития ребенка, насколько хорошо его состояние, сильное сердце, нормальный ли кровоток к сердцу и каково состояние кровообращения в организме малыша, все ли хорошо с пуповиной у мамы в системе мать-плод-плацента, нет ли у младенца пороков сердца, анемии или гипоксии.**





**Двухмерное цветное доплеровское картирование** при нарушении оттока из левого желудочка. Относительно низкая скорость выходного потока левого желудочка кодируется **синим** цветом. В области **сужения** скорость возрастает, возникает наложение спектров (aliasing), и кодировка сигнала потока меняется на **красную**. На участке обструкции регистрируется относительно узкий турбулентный поток.



LV – левый  
желудочек

AO – аорта